

学校编码: 10384

密级_____

学号: 22620081151565

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

燃煤烟气组分对改性活性炭吸附汞
的影响研究

A Study on Impacts of Flue Gas Components on Mercury
Adsorption by Modified Activated Carbon

张 龙 东

指导教师姓名: 罗津晶 副教授

专 业 名 称: 环 境 工 程

论文提交日期: 2011 年 5 月

论文答辩时间: 2011 年 6 月

2011年6月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月

厦门大学博硕士论文摘要库

目录

图索引	IX
表索引	XI
LIST OF FIGURES.....	XII
LIST OF TABLES	XIV
摘要.....	XV
ABSTRACT	XVII
第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 燃煤汞控制技术研究进展.....	3
1.2.1 煤的预处理脱汞	5
1.2.1.1 洗、选煤脱汞	5
1.2.1.2 热解脱汞	6
1.2.2 常规污染物脱除装置脱汞	7
1.2.3 非热等离子及催化氧化脱汞	7
1.2.4 吸附剂吸附脱汞	7
1.2.4.1 普通活性炭	8
1.2.4.2 卤族元素改性活性炭	9
1.2.4.3 硫元素改性活性炭	9
1.2.4.4 苯甲酸改性活性炭	10
1.2.5 燃煤烟气组分对活性炭吸附汞的影响	10
1.2.5.1 CO ₂ 的影响	10
1.2.5.2 O ₂ 的影响	10
1.2.5.3 SO ₂ 的影响	10
1.2.5.4 NO ₂ 的影响	11

1.2.5.5 NO 的影响	11
1.2.5.6 HCl 的影响	12
1.2.5.7 水蒸汽的影响	12
1.3 本课题的研究目的、内容和技术路线.....	13
1.3.1 研究目的	13
1.3.2 研究内容	13
1.3.3 技术路线	14
1.4 本章小结	15
第二章 实验材料与方法	16
2.1 实验装置	16
2.1.1 模拟燃煤烟气产生单元	16
2.1.2 反应单元	19
2.1.3 检测单元	21
2.2 实验主要仪器、试剂与材料.....	23
2.2.1 实验主要仪器	23
2.2.2 实验主要试剂	24
2.2.3 实验材料	25
2.3 实验方法	25
2.3.1 吸附剂的制备	25
2.3.2 样品的表征	26
2.3.3 吸附测试	26
2.3.3.1 实验开始前的准备	26
2.3.3.2 吸附测试的操作步骤及数据处理	27
2.3.4 吸附-脱附-再吸附测试.....	28
2.4 质量控制与问题排解	28
2.4.1 质量控制	29
2.4.1.1 系统的稳定可靠性	29

2.4.1.2 测试数据的可重复性	29
2.4.1.3 系统的日常维护	29
2.4.2 问题排解	30
2.4.2.1 固定床吸附反应器的设计 ^[92]	30
2.4.2.2 冰浴冷凝器的设计	31
2.4.2.3 实验参数的选择	31
2.4.2.4 烟气组分对测汞仪的干扰	31
2.4.2.5 气体泄漏	32
2.4.2.6 倒吸	32
2.5 本章小结	32
第三章 纯氮气氛围下 BPL-CX 对 Hg^0 的吸附实验	34
3.1 BPL-CX 的苯甲酸负载量的筛选	34
3.2 氮气氛围下 BPL-CX 与其它活性炭对 Hg^0 的吸附对比	34
3.3 氮气氛围下 BPL-CX 的吸附-脱附-再吸附测试	37
3.4 本章小结	37
第四章 燃煤烟气组分对 BPL-CX 吸附 Hg^0 的影响实验	39
4.1 单一烟气组分对 BPL-CX 吸附 Hg^0 的影响测试	39
4.1.1 CO_2 的影响	39
4.1.2 O_2 的影响	39
4.1.3 SO_2 的影响	40
4.1.4 NO_2 的影响	41
4.1.5 NO 的影响	42
4.1.6 HCl 的影响	43
4.1.7 水蒸汽的影响	44
4.2 烟气混合物对 BPL-CX 吸附 Hg^0 的影响	45
4.3 本章小结	46

第五章 总结	48
5.1 全文总结	48
5.2 主要创新点	49
5.3 不足之处	50
5.4 下一步的工作及建议	50
参考文献	51
攻读硕士学位期间发表的论文、专利及报告	59
致谢	60

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES (in Chinese)	IX
LIST OF TABLES (in Chinese)	XI
LIST OF FIGURES (in English)	XII
LIST OF TABLES (in English)	XIV
ABSTRACT (in Chinese)	XV
ABSTRACT (in English)	XVII
Chapter 1 PREFACE	1
1.1 Research background.....	1
1.2 Literature review for coal-fired mercury control technology	3
1.2.1 Mercury control during coal pretreatment	5
1.2.1.1 Coal washing and preparation.....	5
1.2.1.2 Coal pyrolysis	6
1.2.2 Conventional air pollution control devices	7
1.2.3 Non-thermal plasma and catalytic oxidation	7
1.2.4 Sorbents adsorption	7
1.2.4.1 Raw activated carbon	8
1.2.4.2 Activated carbon modified by halogen.....	9
1.2.4.3 Activated carbon modified by sulfur.....	9
1.2.4.4 Benzoic acid impregnated activated carbon.....	10
1.2.5 Impact of flue gas components on mercury adsorption by activated carbon.....	10
1.2.5.1 Impact of CO₂.....	10
1.2.5.2 Impact of O₂.....	10
1.2.5.3 Impact of SO₂	10

1.2.5.4 Impact of NO ₂	11
1.2.5.5 Impact of NO	11
1.2.5.6 Impact of HCl.....	12
1.2.5.7 Impact of water vapor	12
1.3 Objectives, contents and technical approach of this study.....	13
1.3.1 Objectives.....	13
1.3.2 Contents	13
1.3.3 Technical approach	14
1.4 Conclusions	15
Chapter 2 MATERIALS AND METHODS	16
2.1 Experimental devices	16
2.1.1 Simulated flue gas generating unit	16
2.1.2 Reaction unit.....	19
2.1.3 Monitoring unit	21
2.2 Instruments, reagents and materials	23
2.2.1 Instruments.....	23
2.2.2 Reagents	24
2.2.3 Materials	25
2.3 Methods	25
2.3.1 Sorbents preparation	25
2.3.2 Samples characteristics	26
2.3.3 Adsorption tests.....	26
2.3.3.1 Preparation before start	26
2.3.3.2 Procedure and data processing	27
2.3.4 Adsorption-desorption-re-adsorption	28
2.4 Quality control and problem solving	28
2.4.1 Quality control	29

2.4.1.1 Stability and reliability of the system	29
2.4.1.2 Reproductivity of the resulting data.....	29
2.4.1.3 Routing maintainece of the system.....	29
2.4.2 Problems solving	30
2.4.2.1 Design of the fixed-bed adsorption reactor ^[92]	30
2.4.2.2 Design of the ice-bath-condenser.....	31
2.4.2.3 Determination of the experimental parameters.....	31
2.4.2.4 Interferes of flue gas components to mercury analyzer	31
2.4.2.5 Gas leakage	32
2.4.2.6 Clogging	32
2.5 Conclusions	32
Chapter 3 Hg⁰ adsorption by BPL-CX under pure N₂	34
3.1 Determination of impregnation concentration for BPL-CX.....	34
3.2 Comparation of mercury adsorption by BPL-CX and other activated carbons under N ₂	34
3.3 Adsorption-desorption-re-adsorption test of BPL-CX under N ₂	37
3.4 Conclusions	37
Chapter 4 Impact of coal-fired flue gas components on Hg⁰ adsorption by BPL-CX	39
4.1 Impact of single flue gas component on Hg ⁰ adsorption by BPL-CX	39
4.1.1 Impact of CO ₂	39
4.1.2 Impact of O ₂	39
4.1.3 Impact of SO ₂	40
4.1.4 Impact of NO ₂	41
4.1.5 Impact of NO	42

4.1.6 Impact of HCl.....	43
4.1.7 Impact of water vapor	44
4.2 Impact of flue gas mixture on Hg ⁰ adsorption by BPL-CX	45
4.3 Conclusions	46
Chapter 5 Summary	48
5.1 General conclusions.....	48
5.2 Innovation	49
5.3 Disadvantage of this study	50
5.4 Future work and suggestions.....	50
REFERENCES	51
PUBLICATIONS DURING GRADUATE STUDY	59
ACKNOWLEDGEMENTS.....	60

图索引

图 1-1 全球汞循环示意图	1
图 1-2 2005 年全球来自不同行业的人为源汞排放比例	2
图 1-3 2005 年全球人为源汞排放分布图	3
图 1-4 燃煤过程中汞的迁移转化示意图	5
图 1-5 美国西部研究院发展的用于脱汞的热预处理概念示意图	6
图 1-6 吸附剂喷射法示意图	8
图 1-7 本论文技术路线图	14
图 2-1 活性炭对烟气中气态汞的吸附性能测试系统示意图 ^[88]	16
图 2-2 水蒸汽浓度测定方法示意图	17
图 2-3 用于盛放汞渗透管的 U 型管装置 ^[88]	18
图 2-4 使用说明书中的汞渗透管示意图	18
图 2-5 固定床吸附反应器示意图 ^[90]	20
图 2-6 吸附反应器在烘箱内部的安装实物图	21
图 2-7 Jerome 431-X 原理图（采样电磁开关关闭）	22
图 2-8 Jerome 431-X 原理图（采样电磁开关打开）	23
图 2-9 测汞仪实物图（整体（左）与操作板（右））	23
图 2-10 填充完吸附剂的吸附反应器实物图（局部）	28
图 3-1 四种吸附剂在 N ₂ 中 140 °C 下的穿透曲线	36
图 3-2 N ₂ 氛围下 BPL-CX 对 Hg ⁰ 的吸附-脱附-再吸附动力学曲线	37
图 4-1 CO ₂ （13%）对 BPL-CX 吸附 Hg ⁰ 的影响（140 °C）	39
图 4-2 O ₂ （6%）对 BPL-CX 吸附 Hg ⁰ 的影响（140 °C）	40
图 4-3 SO ₂ （300×10 ⁻⁶ ）对 BPL-CX 吸附 Hg ⁰ 的影响（140 °C）	41
图 4-4 NO ₂ （20×10 ⁻⁶ ）对 BPL-CX 吸附 Hg ⁰ 的影响（140 °C）	42
图 4-5 NO（300×10 ⁻⁶ ）对 BPL-CX 吸附 Hg ⁰ 的影响（140 °C）	43
图 4-6 HCl（20×10 ⁻⁶ ）对 BPL-CX 吸附 Hg ⁰ 的影响（140 °C）	44
图 4-7 水蒸汽（9%）对 BPL-CX 吸附 Hg ⁰ 的影响（140 °C）	45
图 4-8 烟气混合物对 FLUEPAC、DARCO FGD 以及 BPL-CX 吸附 Hg ⁰ 的影响对	

比 (140 °C)	46
------------------	----

厦门大学博士论文摘要库

表索引

表 2-1 本研究的模拟烟气组分配置	19
表 2-2 Jerome 431-X 测汞仪的性能参数	23
表 2-3 实验主要仪器列表	24
表 2-4 实验主要试剂	24
表 2-5 常规吸附测试所采用的主要操作步骤	27
表 2-6 吸附-脱附-再吸附测试的操作步骤.....	28
表 2-7 系统的稳定可靠性测试结果	29
表 2-8 所得数据的可重复性	29
表 2-9 实验参数及其选择理由	31
表 3-1 在不同浓度苯甲酸溶液中浸渍得到的 BPL-CX 及其汞饱和吸附容量	34
表 3-2 BPL-1000、BPL 与 BPL-CX 表面含氧官能团的含量 ^[105]	35
表 3-3 5 种活性炭的饱和吸附容量及各自物理属性	35

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1 Mercury cycle schematic diagram.....	1
Fig. 1-2 Proportion of global anthropogenic emissions of mercury to air in 2005 from various sectors.....	2
Fig. 1-3 Global distribution of anthropogenic emissions of mercury in 2005.....	3
Fig. 1-4 Mercury transport and transformation during coal combustion.....	5
Fig. 1-5 The thermal pretreatment concept for mercury removal being developed by Western Research Institute	6
Fig. 1-6 Schematic diagram for sorbent injection technology	8
Fig. 1-7 Technical approach for this thesis	14
Fig. 2-1 Testing system for adsorption of mercury in flue gas by activated carbon....	16
Fig. 2-2 Schematic diagram for measuring water vapor concentration	17
Fig. 2-3 U-tube for containing mercury permeation tube	18
Fig. 2-4 Schematic figure for mercury permeation tube in user's manual	18
Fig. 2-5 Fixed-bed adsorption reactor.....	20
Fig. 2-6 Installation of the adsorption reactor in the oven.....	21
Fig. 2-7 Schematic diagram of Jerome 431-X (sample solenoid closed)	22
Fig. 2-8 Schematic diagram of Jerome 431-X (sample solenoid open)	23
Fig. 2-9 Pictures for Jerome 431-X mercury analyzer.....	23
Fig. 2-10 Picture of part of the adsorption reactor with sorbents filled in.....	28
Fig. 3-1 Breakthrough curves for four sorbents in N ₂ at 140 °C	36
Fig. 3-2 Kinetics curve for Hg ⁰ adsorption-desorption-re-adsorption by BPL-CX under N ₂	37
Fig. 4-1 Impact of CO ₂ (13%) on mercury adsorption on BPL-CX at 140 °C	39
Fig. 4-2 Impact of O ₂ (6%) on mercury adsorption on BPL-CX at 140 °C	40
Fig. 4-3 Impact of SO ₂ (300×10 ⁻⁶) on mercury adsorption on BPL-CX at 140 °C ..	41
Fig. 4-4 Impact of NO ₂ (20×10 ⁻⁶) on mercury adsorption by BPL-CX at 140 °C	42
Fig. 4-5 Impact of NO (300×10 ⁻⁶) on mercury adsorption by BPL-CX at 140 °C ...	43

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库